



НОВОЕ О МЕЖПЛАНЕТНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

СОВЕТСКИЕ РАКЕТЫ И СПУТНИКИ ПОМОГАЮТ РАСКРЫВАТЬ ТАЙНЫ
СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА, КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ, МЕТЕОРНЫХ ПОТОКОВ

18 октября 1967 года завершен рейс к Венере очередной советской межпланетной станции. С помощью разнообразной аппаратуры, установленной на борту «Венеры-4», предусматривалось проведение широких научных исследований в космическом пространстве.

С начала исследований с помощью космических летательных аппаратов отечественная наука добилась выдающихся успехов. Советские межпланетные станции первыми в мире достигли Венеры и Марса. В 1966 году наша станция доставила на поверхность Венеры вымпел с Гербом Советского Союза. Со дня первого межпланетного рейса автоматической станции «Луна-1» проведены обширные исследования межпланетного пространства, обогатившие науку ценнейшими сведениями.

Редакция попросила одного из ведущих специалистов по физике космоса доктора технических наук К. И. Грингауза рассказать о том, что нового узнали ученые о межпланетном пространстве за последнее время.

НЕСМОТЯ на то что окружающее Солнце пространство, в котором пролегают орбиты планет Солнечной системы, находится гораздо ближе к Земле, чем межзвездное, свойства первого до начала прямых измерений с помощью космических аппаратов были изучены, как это ни странно на первый взгляд, гораздо хуже.

Межпланетное пространство заполнено весьма разреженной материальной средой, состоящей из плазмы (ионов и электронов) со сравнительно малыми энергиями частиц (не более тысяч электрон-вольт) и частиц твердого вещества (межпланетной пыли или микрометеоритов). Это пространство пронизывается космическими лучами, заряженными частицами высоких энергий (до 10^9 электрон-вольт) галактического и солнечного происхождения. На движение частиц космических лучей в солнечной системе существенно влияют межпланетные магнитные поля.

До 1958—1959 гг. большинство астрофизиков считали правильной так называемую статическую модель межпланетной плазмы. Согласно этой модели межпланетное пространство заполнено хаотически движущимися ионами водорода

(протонами) и электронами с температурой порядка 10^6 °К. Направленное движение этих частиц в статической модели отсутствовало. Концентрация ионизированного межпланетного газа вблизи орбиты Земли считалась равной 10^3 частиц в см^3 . Предполагали, что временами через эту среду движутся от Солнца потоки заряженных частиц $\sim 10^{10}$ — 10^{11} через см^2 в секунду со скоростями 1000 км/сек — так называемые солнечные корпускулярные потоки.

Достоверных сведений о величинах и ориентации межпланетных магнитных полей не было, хотя кое-что о неоднородностях этих полей можно было получить из данных, касающихся вариаций космических лучей, наблюдаемых на Земле.

Первым в мире космическим аппаратом, вышедшим за пределы околоземного космического пространства (то есть той области межпланетного пространства, физические свойства которой в значительной степени определяются влиянием Земли), была советская автоматическая станция «Луна-1». На этой станции, запущенной к Луне 2 января 1959 г. для исследования основных характеристик межпланетного пространства, были

установлены женных ча ченные для стиц с мал счегтики ко позволяющие ки и энерги ных заряж магнитометр магнитного микрометеор та твердых мых станци лета.

Следует от изучения фи теристик ме странства по работка нов боров, котор проводить ф рументы в отличающих ных. Так, дл зированных рных, начин годов, широ зондовые ме на измерени токов, текущ ный в ион зонд-электр потенциал в Если такой на поверхно аппарата в пространстве ем ультрафи ния Солнца эмиссия, в станет исто нов и зондо бльшей сте се солнечн чем ионизир зон, концент указывали е а. Поэтому альные вари ряженных ч сия электро электрическ сновном оп ных частиц ский аппара

Значитель н измерение у щем межплн ве. Объясн имеется мн реле и дру собственны сто превыш нее поле, пс жу магнито на штангал дальше уда го аппарат; влияние м устройств.

установлены ловушки заряженных частиц, предназначенные для регистрации частиц с малыми энергиями; счетчики космических лучей, позволяющие измерять потоки и энергии высокоэнергичных заряженных частиц; магнитометр для измерения магнитного поля; датчики микрометеоритов для подсчета твердых частиц, встречаемых станцией во время полета.

Следует отметить, что для изучения физических характеристик межпланетного пространства потребовалась разработка новых научных приборов, которые бы позволили проводить физические эксперименты в условиях, резко отличающихся от лабораторных. Так, для изучения ионизированных газов в лабораториях, начиная с двадцатых годов, широко применялись зондовые методы, основанные на измерении электрических токов, текущих на погруженный в ионизированный газ зонд-электрод, электрический потенциал которого меняется. Если такой зонд установить на поверхности космического аппарата в межпланетном пространстве, то под действием ультрафиолетового излучения Солнца возникнет фотоэмиссия, в результате зонд станет источником электронов и зондовый ток будет в большей степени определяться солнечным излучением, чем ионизированным межпланетным газом, концентрация которого, как мы указывали в начале статьи, весьма мала. Поэтому были разработаны специальные варианты зондов — ловушки заряженных частиц, в которых фотоэмиссия электронов была сильно подавлена электрическим полем, и зондовый ток в основном определялся потоком заряженных частиц из окружающей космической среды.

Значительные трудности представляет измерение магнитных полей в окружающем межпланетную станцию пространстве. Объясняется это тем, что на ней имеется много токонесущих проводов, реле и других устройств, обладающих собственными магнитными полями, часто превышающими по величине внешнее поле, подлежащее измерению. Поэтому магнитометр, например, располагают на штангах, стараясь его как можно дальше удалить от корпуса космического аппарата и таким образом ослабить влияние магнитных полей бортовых устройств.

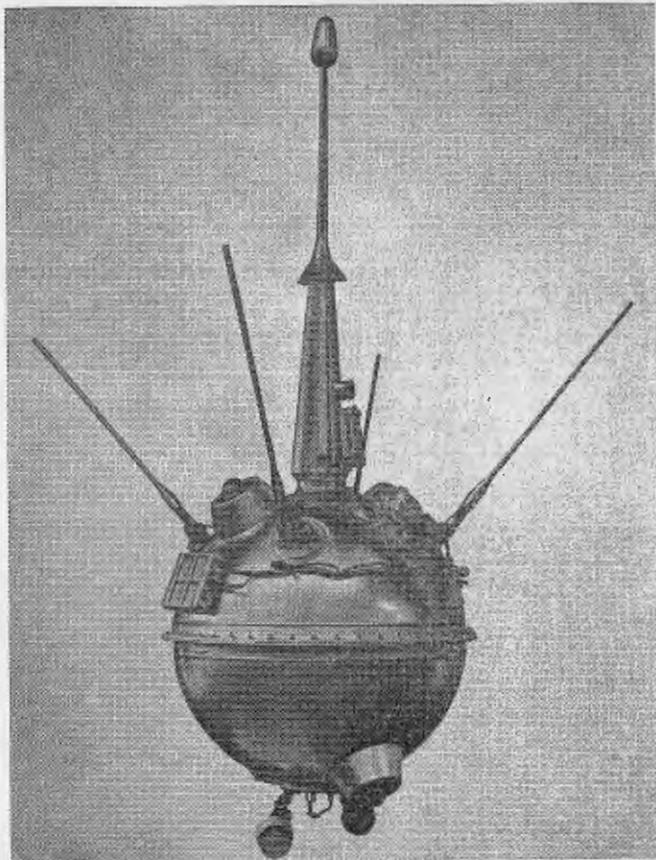


Рис. 1. Советская автоматическая станция «Луна-2», запущенная 12 сентября 1959 г., — первый в мире аппарат, достигший Луны. Вверху виден магнитометр, удаленный от корпуса аппарата при помощи штанги, и ловушки заряженных частиц, расположенные в разных местах на корпусе.

Измерение в межпланетном пространстве малоэнергичных заряженных частиц, космических лучей, магнитного поля и микрометеоритов было одной из научных задач, которые решали запущенные в 1959 г. космические аппараты «Луна-2» (рис.1) и «Луна-3», а также многие другие советские дальние космические аппараты, запущенные позднее — «Венера-1» (1961 г., рис. 2), «Марс-1» (1962 г.), «Зонд-1» (1964 г.), «Зонд-2» (1964 г.), «Зонд-3» (1965 г.), «Венера-2» (1965 г.), «Венера-3» (1965 г.), «Луна-10» (1966 г.). Измерения этих же характеристик межпланетного пространства производились на многих американских космических аппаратах («Пионер-5», «Эксплорер-10», «Маринер-2», «Эксплорер-18» (ИМП-1), «Маринер-4», «Пионер-6», «Пионер-7»).

Со времени запуска первых космических аппаратов ракетная техника непрерывно развивалась. Развивалось и научное приборостроение для космических исследований. Повышались чувствительность и разрешающие способности при-

боров, устанавливаемых на космические аппараты. Увеличивалось число приборов, использующих различные физические принципы для измерения одних и тех же величин.

И все же трудно переоценить результаты первых прямых опытов в межпланетном пространстве, проведенных в 1959—1962 гг. при помощи сравнительно малосовершенных с современной точки зрения приборов. Именно эти первые опыты привели к существенному пересмотру сложившихся ранее представлений и определили диапазон подлежащих измерению величин, что во многом облегчило дальнейшее развитие техники экспериментов.

ПЛАЗМА И МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ

Начнем с измерений межпланетной плазмы (малозергичных заряженных частиц). Анализ результатов плазменных измерений 1959—1962 гг. (на советских космических аппаратах эти измерения проводили В. В. Безруких, В. Д. Озеров, Р. Е. Рыбчинский и автор настоящей статьи) показал, что межпланетное пространство заполнено потоками ионизированного газа (главным образом протонов), движущегося от Солнца. Величины потоков составляют примерно 10^8 — 10^9 частиц через см^2 в секунду. Скорости их вблизи орбиты Земли — 300—700 км/сек, а концентрация составляет обычно единицы частиц в см^3 , доходя в отдельных случаях до 20 частиц в см^3 . Эти постоянно существующие, дви-

жущиеся от Солнца потоки заряженных частиц получили в мировой литературе название солнечного ветра.

Более правильной является «динамическая» модель, так как частицы межпланетной плазмы (солнечного ветра) всегда имеют направленные скорости, удаляясь от Солнца. Концентрация заряженных частиц в межпланетном пространстве оказалась на 2—3 порядка меньше, чем это считалось до начала прямых измерений.

Первые же эксперименты на советских лунных космических ракетах сильно «отодвинули» от Земли границу межпланетного пространства. Опыты на лунных ракетах показали, что влияние Земли заметно вплоть до расстояний около 80 000 км, где при помощи ловушек заряженных частиц еще наблюдались специфические потоки электронов, отсутствующие в невозмущенном Землей межпланетном пространстве.

В настоящее время установлено, что в направлении на Солнце граница межпланетного пространства проходит на расстоянии 10—12 земных радиусов от Земли, а в противоположном направлении расстояние до нее, по-видимому, превышает 80 земных радиусов (около 500 000 км). В направлении, перпендикулярном линии Солнце—Земля, граница межпланетного пространства находится примерно на расстоянии 20 земных радиусов.

Измерения межпланетного магнитного поля (Ш. Ш. Долгинов, Н. В. Пушкин, Е. Г. Ерошенко и др.) показали, что потоки плазмы, непрерывно испускаемые Солнцем, намагничены. Сопоставление результатов магнитных и плазменных измерений в межпланетном пространстве позволило установить, что между ними существует зависимость — средняя ориентация межпланетного магнитного поля определенным образом связана со скоростью потоков солнечного ветра. Величина межпланетного магнитного поля также связана с величиной потоков солнечного ветра и вблизи орбиты Земли составляет около 5—10 гамм (1 гамма = 10^{-5} эрстеда).

Исследования солнечного ветра и межпланетных магнитных полей весьма успешно продолжались в последние годы. В течение длительного времени на ряде космических аппаратов измерялись потоки и скорости солнечного ветра. Оказалось, что потоки меняются от $3 \cdot 10^7 \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$ до $\sim 10^9 \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$, а скорости их лежат в пределах от

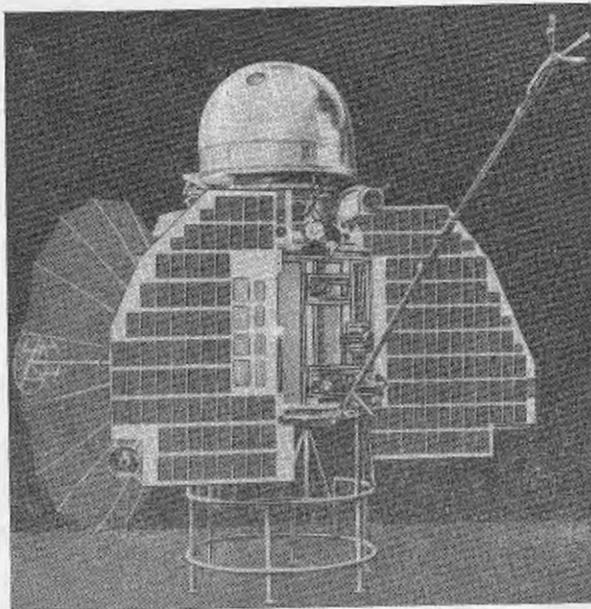


Рис. 2. Советская автоматическая межпланетная станция «Венера-1» — первый космический аппарат, запущенный в направлении планеты Венера.

токи заряженных
ровой литературе
етра.

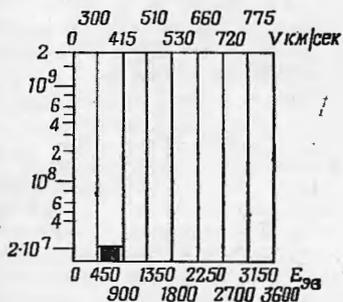
вляется «динамик
ак частицы меж-
солнечного ветра)
ленные скорости,
онцентрация заря-
планетном прост-
—3 порядка мень-
до начала пря-

менты на совет-
ких ракетах силь-
мили границу меж-
ва. Опыты на лун-
что влияние Зем-
расстояний около
мощи ловушек за-
наблюдались спе-
электронов, отсут-
нном Землей меж-
ве.

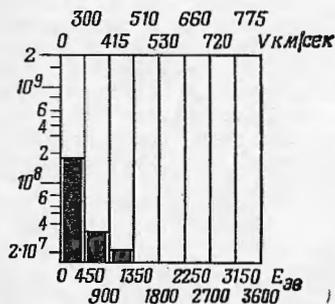
установлено, что в
це граница меж-
тва проходит на
мных радиусов от
ложном направле-
по-видимому, пре-
радиусов (около
тении, перпендику-
—Земля, граница
анства находится
ии 20 земных ра-

етного магнитного
в, Н. В. Пушков,
енко и др.) показа-
рки плазмы, непре-
ускаемые Солнцем,
ы. Сопоставление
магнитных и
измерений в меж-
пространстве по-
гановить, что меж-
уществует зависи-
редняя ориентация
ого магнитного
ценным образом
скоростью потоков
ветра. Величина
ого магнитного
связана с величи-
в солнечного ветра
орбиты Земли со-
коло $5 \div 10$ гам-
= 10^{-5} эрстеда).

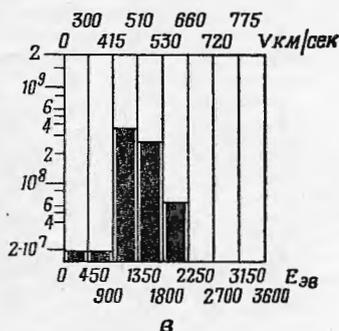
ания солнечного
ежпланетных маг-
лей весьма успеш-
кались в последние
чение длительного
ряде космических
измерялись по-
рости солнечного
залось, что потоки
от $3 \cdot 10^7$ см⁻² сек⁻¹
м⁻² сек⁻¹, а скоро-
кат в пределах от



а



б



в

Рис. 3. Образцы энергетических спектров протонов солнечного ветра, полученные в межпланетном пространстве советскими космическими аппаратами на расстояниях, измеряемых миллионами километров от Земли. По оси абсцисс на нижней шкале отложены энергии частиц в электрон-вольтах, на верхней шкале — соответствующие скорости протонов в км/сек; по оси ординат отложен поток частиц в данном энергетическом интервале в частицах через см² в секунду. Спектр (а) получен на космическом аппарате «Зонд-2» 5.XII 1964 г. Спектры (б) и (в) на аппарате «Венера-3» 16.XI.1965 г. и 7.I.1966 г. соответственно. Из спектров видно, что характеристики солнечного ветра в межпланетном пространстве (потоки частиц и их скорости) могут меняться в широких пределах.

280 до 750 км/сек (рис. 3). Установлено также, что температура протонов в потоках солнечной плазмы вблизи орбиты Земли меняется от $5 \cdot 10^5$ °K до $5 \cdot 10^3$ °K. Причем в направлении вдоль силовых

линий межпланетного магнитного поля солнечный ветер горячее, чем в перпендикулярном. Потоки ионов солнечного ветра в основном состоят из протонов. Однако в них обнаруживается 5—8% ядер гелия (α -частиц).

Измерения солнечного ветра, проведенные в апреле—мае 1966 г. ловушками заряженных частиц, установленными на первом искусственном спутнике Луны — советской автоматической станции «Луна-10», показали, что вблизи Луны солнечный ветер возмущен, что кроме потоков плазмы, движущихся от Солнца, там наблюдаются потоки плазмы, движущиеся в иных направлениях.

Величины и направления межпланетных магнитных полей сильно колеблются. Но если усреднить их, то окажется, что силовые линии магнитного поля, начинающиеся на Солнце, в межпланетном пространстве имеют характер так называемых спиралей Архимеда, кривизна которых определяется скоростью солнечного ветра V_c . При $V_c = 300$ км/сек вектор межпланетного магнитного поля вблизи орбиты Земли составляет с вектором, идущим от Солнца, угол 45° . Если посмотреть, как направлены связанные с Солнцем магнитные силовые линии в плоскости эклиптики, то окажется, что можно выделить секторы, в которых силовые линии направлены к Солнцу. Они чередуются с секторами, в которых силовые линии направлены от Солнца (рис. 4), то есть межпланетное магнитное поле в солнечной системе имеет секторную структуру. На приведенном рисунке, относящемся к концу 1963 г., видно четыре сектора. Однако число их непостоянно. Так, например, в 1962 г. таких секторов было всего два.

В числе важнейших задач, связанных с исследованием межпланетного пространства, изучение потоков солнечной плазмы занимает одно из первых мест.

Потоки солнечной плазмы определяют межпланетные магнитные поля, а следовательно, и траектории космических лучей в солнечной системе. Потоки солнечной плазмы определяют форму магнитосферы Земли, то есть области вблизи Земли, в которой магнитное поле имеет регулярный характер. Сейчас уже нет сомнений в том, что причиной магнитных и ионосферных бурь, наблюдаемых в околоземном пространстве, являются потоки солнечной плазмы в межпланетном пространстве. Поэтому информация об этих потоках или точнее о вариациях их физических характеристик очень нужна для решения таких практических задач, как прогнозирование радиосвязи.

Многочисленные измерения в радиационных поясах Земли показали, что интенсивность потоков захваченных в них заряженных частиц меняется во время геомагнитных бурь и, значит, за-

висит также от вариаций солнечного ветра.

В 1963 г. были опубликованы результаты опытов по имитации в лабораторных условиях воздействия потоков протонов солнечной плазмы на твердые металлические мишени, а также на металлические порошкообразные массы и такие же массы из скальных пород.

Опыты показали, что воздействие протонных потоков может сглаживать и нивелировать макроскопические особенности поверхностей и вместе с тем цементировать отдельные частицы, при этом может образоваться крупная и пористая масса. Это позволило высказать предположение, что многие необычные свойства лунной поверхности объясняются воздействием на нее солнечного ветра (на Луне, как известно, магнитное поле настолько мало, что не в состоянии оказать сколько-нибудь заметное противодействие солнечному ветру).

Оптические особенности лунной поверхности, отличающие ее от поверхности земных материалов (сильное обратное рассеяние, бесцветность), могут быть экспериментально воспроизведены на порошкообразном базальте при бомбардировке его потоками протонов, эквивалентной воздействию потока солнечного ветра в течение 10^5 лет. Бомбардировка этого же материала ионами гелия дала худшие результаты в смысле приближения к свойствам лунной поверхности.

Из приведенных примеров, относящихся к явлениям, связанным с потоками

солнечной плазмы, видно, что изучение этих потоков должно дать ключ к пониманию весьма широкого класса явлений в геофизике и физике планет.

ЖЕСТКАЯ РАДИАЦИЯ

Исследование космических лучей входит в программу научных исследований, проводимых почти на всех космических аппаратах. В Советском Союзе первые эксперименты по изучению космических лучей в межпланетном пространстве (так же как и многие последующие эксперименты) выполнены С. Н. Верновым, А. Е. Чудаковым, П. В. Вакуловым, Е. В. Горчаковым, Ю. И. Логачевым, Л. В. Курносовой, Л. А. Разореновым, М. И. Фрадковым. В дальнейшем изучением космических лучей между Землей и Луной и вблизи Луны занялись Н. Д. Григорьев, И. А. Савенко и другие.

Некоторые из этих частиц приходят в солнечную систему извне (галактические космические лучи), источником других является Солнце.

Галактические космические лучи состоят из частиц с энергиями более $100 \cdot 10^6$ электрон-вольт. Потоки их весьма устойчивы и составляют $1-2$ частицы $\text{см}^{-2} \text{сек}^{-1}$. С увеличением солнечной активности поток космических лучей убывает. Солнце, как показали многие опыты, проведенные в межпланетном пространстве, непрерывно испускает протоны и ядра гелия с энергиями от 10^6 эв до $20 \cdot 10^6$ эв. Потоки этих частиц невелики и, по-видимому, не опасны для живых организмов.

Как уже отмечалось, траектории космических лучей в межпланетном пространстве определяются конфигурацией магнитных силовых линий, имеющих форму архимедовых спиралей. Об этом, в частности, свидетельствуют измерения протонов солнечного происхождения с энергиями $1-5 \cdot 10^6$ эв, выполненные на космических аппаратах «Зонд-3», «Венера-2» и «Венера-3» в 1965 г. Эти измерения показали, что в одно и то же время потоки таких частиц на различных силовых линиях межпланетного магнитного поля существенно отличаются друг от друга.

Наиболее опасны внезапные повышения интенсивности космических лучей во время так называемых солнечных вспышек — кратковременных повышений яркости (в оптическом диапазоне) некоторых участков поверхности Солнца (длительностью от десятка минут до нескольких часов). Поток частиц высоких энергий в межпланетном про-

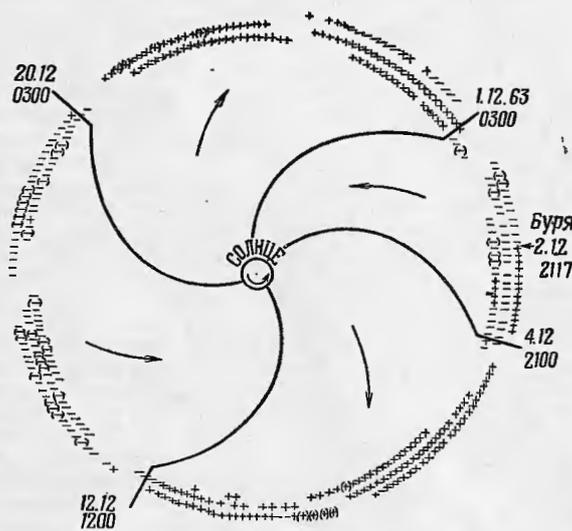


Рис. 4. Секторная структура межпланетного магнитного поля. Стрелки указывают преимущественное направление магнитного поля в каждом секторе: знак (+) соответствует полю, направленному от Солнца, а знак (-) — к Солнцу. Из рисунка видно, что во время магнитной бури направление магнитного поля внутри сектора может быстро меняться.

страно
поток
Так
ными
наты
терист
после
шек по
Уста
солнеч
от сол
муна
период
дать б
щихся
более
Анал
ми про
горую
ходьсь
время
зал, ч
сть с
мую. П
ческих
ских
вспыш
зирова
важней
навтик

Прям
го веш
стве, к
в СССР
1959 г
дых ча
ся по
ном в
враща
этих ч
до 72
щения,
орбиты
сравни
стущен
ками.
Фото
верхно
ного м
света)
марну
части
ббры,
аппара
части
чтобы
ских
разных
ся сре
орных
Земли.
ны с
(рис. 5)

странстве может намного превосходить поток галактических космических лучей.

Так как процессы, связанные с солнечными вспышками, еще во многом не поняты, то надежное предсказание характеристик солнечных космических лучей после вспышек и появления самих вспышек пока невозможно.

Установлено, что частота вспышек солнечных космических лучей зависит от солнечной активности. В годы минимума вспышки редки, в то время как в период максимума за год можно наблюдать более 10 вспышек, сопровождающихся генерацией протонов с энергиями более $100 \cdot 10^6$ эв.

Анализ дозы, создаваемой солнечными протонами с энергией $30 \cdot 10^6$ эв, которую мог бы получить космонавт, находясь в межпланетном пространстве во время вспышки 12 ноября 1960 г., показал, что она составляла 1850 рад., то есть существенно превышала допустимую. Поэтому проблема защиты космических кораблей от солнечных космических лучей, генерируемых во время вспышек, и проблема надежного прогнозирования вспышек относятся к числу важнейших современных проблем космонавтики.

МИКРОМЕТЕОРИТЫ

Прямые исследования частиц твердого вещества в межпланетном пространстве, как уже отмечалось, были начаты в СССР при полете лунных ракет в 1959 г. Подавляющее большинство твердых частиц в солнечной системе движется по эллиптическим орбитам, в основном в том же направлении, в котором вращаются Солнце и планеты. Скорость этих частиц относительно Земли от 12 до 72 км/сек. Часто они образуют сгущения, иногда растянутые вдоль своей орбиты, иногда сосредоточенные на сравнительно небольшом участке. Такие сгущения называются метеорными потоками.

Фотометрические наблюдения с поверхности Земли (наблюдения рассеянного межпланетной пылью солнечного света) дают возможность оценить суммарную пространственную плотность всех частиц с массами менее 10^{-6} гр. А приборы, установленные на космических аппаратах, позволяют регистрировать частицы с массой до 10^{-13} гр. Для того чтобы оценить частоту встреч космических аппаратов с микрометеоритами разных размеров, можно воспользоваться средней кривой распределения метеорных частиц по массам в окрестности Земли. Данные этих измерений получены с помощью ракет и спутников (рис. 5).

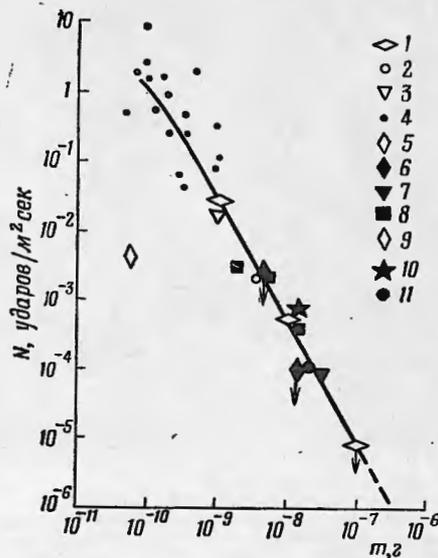


Рис. 5. Сводная кривая усредненного распределения метеорных частиц по массам в окрестности Земли по наблюдениям с ракет и спутников:
1 — «Эксплорер-8» (США), 2 — «Авангард-3» (США), 3 — «Эксплорер-1» (США), 4 — ракеты США, 5 — третий спутник (СССР), 6 — первая космическая ракета (СССР), 7 — вторая космическая ракета (СССР), 8 — автоматическая межпланетная станция «Луна-3» (СССР), 9 — «Пионер-1» (США), 10 — «Электрон-2» (СССР), 11 — «Электрон-4» (СССР).

По мнению некоторых ученых, вблизи Земли имеется пылевое облако с повышенной концентрацией твердых частиц. В среднем число встреч с микрометеоритами в межпланетном пространстве вдали от Земли должно быть меньше, чем это следует из приведенной кривой.

В декабре 1962 г. и январе 1963 г. советской станцией «Марс-1» на удалении 23—45 млн. км от Земли была зарегистрирована повышенная плотность твердых частиц, возможно, соответствующая ранее не известному метеорному потоку. Подобные встречи в межпланетном пространстве с неизвестными метеорными потоками наблюдались и при полетах американских космических аппаратов. Предсказать эти встречи пока трудно. Метеорные потоки представляют определенную опасность для космического корабля с точки зрения эрозии его поверхности, порчи оптики и т. д.

Дальнейшее изучение различных областей межпланетного пространства позволит уточнить распределение твердых частиц в солнечной системе и, может быть, прогнозировать встречи космических аппаратов с метеорными потоками.

К. ГРИНГАУЗ,

доктор технических наук.